仿生偏振光导航传感器研究进展

褚金奎*, 张然, 王志文, 王寅龙

大连理工大学机械工程学院, 大连 116024

* 联系人, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

2015-12-04 收稿, 2016-01-08 修回, 2016-01-11 接受, 2016-03-23 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2011CB302101, 2011CB302105)资助

摘要 生物学家研究发现, 经过35亿年的进化, 多种昆虫都进化出了感知天空偏振光方位角并将其用于导航的奇异能力, 以帮助其完成觅食、归巢及迁徙等行为. 受到昆虫奇特偏振光导航能力的启发, 基于天空偏振光的天文导航技术已成为仿生导航技术领域的研究热点, 研究人员已开发出多种模仿生物偏振导航结构和机理的偏振导航传感器, 并且该类传感器正朝着微型化及集成化方向发展. 已取得的研究成果表明该导航手段具有完全自主、误差不随时间累积和实时性好等优点, 可为交通运输、科学研究及资源勘测等社会各领域提供一种行之有效的导航手段.

关键词 仿生, 偏振光, 导航, 传感器, 昆虫

导航本领是动物及人类生存和发展的基本能力, 如动物觅食、归巢及长途迁徙等均依赖于其所具有的特定导航定位能力. 从烟雾信号、天体导航到指南针、航海精密计时器再到地基无线电导航及天基无线电导航, 导航定位技术的每次革新无不加速了人类的进步. 随着信息时代的到来, 导航定位技术越发凸显出其重要意义, 在军事、交通运输、水利水电、海洋渔业、气象测报、国土测绘、减灾救灾和公共安全等领域具有不可替代的作用, 牵引推动了电子、通信、机械制造、地理信息等相关产业和信息服务业的发展, 产生了显著的经济效益和社会效益.

目前应用较多的导航定位技术主要包括惯性导航、陆基及天基无线电(卫星)导航和天文导航. 惯性导航系统主要包括加速度计及陀螺仪, 其通过对测量得到的加速度进行积分, 得到被测载体的速度及位移. 无线电导航技术通过处理接收到的无线电信号的振幅、频率、时间和相位等信息, 得到载体与多个无线电基站(卫星)的相对速度及距离, 实现导航

定位. 目前全球定位系统(global positioning system, GPS)、伽利略系统及我国的北斗系统等天基无线电导航系统的应用已十分广泛. 天文导航利用对自然天体的测量来确定自身位置和航向, 是一种完全自主的导航方式. 与惯性导航系统相比, 天文导航系统误差不随时间积累, 而与GPS等无线电导航技术相比又不易受到欺骗、干扰和破坏. 目前, 现代天文导航系统主要以星敏感器、紫外月球敏感器和红外地球敏感器作为探测部件, 通过星图搜索匹配技术实现导航定位.

生物学家研究发现, 多种昆虫经过35亿年的进化形成了精巧的复眼器官, 具备了利用复眼偏振识别结构感知天空偏振矢量场信息, 获得导航定位的能力^[1-6], 为人类研究新型自主导航器件提供了很好的模仿对象. 受到昆虫奇特偏振光导航能力的启发, 国内外多位学者通过模仿昆虫的偏振敏感结构及偏振导航机制, 对仿生偏振光导航机理、方法与手段进行了大量研究, 并开发出多种偏振导航传感器. 本

引用格式: 褚金奎, 张然, 王志文, 等. 仿生偏振光导航传感器研究进展. 科学通报, 2016, 61: 2568-2577

Chu J K, Zhang R, Wang Z W, et al. Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2568-2577, doi: 10.1360/N972015-01163

文首先对昆虫利用天空偏振光进行导航的生物机理进行了说明, 然后对目前国内外偏振导航传感器的研究现状进行了介绍。

1 昆虫的天空偏振光导航生物机理

太阳光经过大气照射地表的过程中发生散射, 散射光发生极化进而形成具有规律性分布的天空偏振矢量场。该矢量场的分布模式主要包括偏振光方位角分布模式与偏振度分布模式。学者大量研究表明, 晴朗天空下, 天空偏振光方位角分布模式基本符合Rayleigh散射理论^[7]; 在云、雾等气溶胶条件下, 相较于晴朗天空, 由于多次散射的影响, 天空散射光的偏振度会大幅下降, 但偏振光方位角分布模式受天气条件影响较小, 基本保持稳定^[8]。

生物学家研究发现, 经过35亿年的进化, 多种昆虫^[9]、迁徙鸟类^[10]、某些两栖类^[11]、爬行类^[12]及哺乳类中的蝙蝠^[13]都进化出了感知天空偏振光方位角并将其用于导航的奇异能力, 以帮助其完成觅食、归巢及迁徙等行为。1949年, Frisch^[1]发现蜜蜂可利用天空紫外偏振光进行导航, 其后沙蚁^[2]、蟋蟀^[3]、蝗虫^[4]、蝴蝶^[5]甚至夜行性蜉蝣^[6]等昆虫的偏振光导航能力也被陆续发现。生物行为学及形态学实验研究显示, 具有偏振光导航能力的昆虫, 其复眼背部边缘区域(dorsal rim area, DRA)内一些排列规则的特殊小眼(图1)对偏振光非常敏感^[9]。以蝗虫^[4]眼部DRA区域的小眼结构为例, 其结构如图2所示。小眼长度在350~450 μm , 横截面积只有70 μm^2 左右。小眼由晶锥、感杆束、基膜等组成, 晶锥主要起屈光和保护作用。感杆束中有数个小网膜细胞(或称为感杆细胞), 小网膜细胞由细胞膜向中腔伸出大量的微绒毛, 微绒毛的排列形式对光偏振处理有决定性作用。基膜存在于小眼底部, 小眼的轴突通过基膜与神经节相联系, 进而对光信号进行处理。通过进一步的组织学及电生理学实验, 研究人员发现一般小眼神经感杆内微绒毛排列杂乱无章, 而DRA小眼神经感杆内微绒毛(图3)的空间排列具有轴向规则一致、径向相互垂直的特点^[14], 该结构特点不仅使视神经细胞具有较高的偏振光敏感特性, 并且通过神经感杆的偏振光电矢量正交敏感结构与中枢神经层视神经叶部分的偏振对立神经元(polarization-opponent neurons, POL-neurons)的协同作用^[15], 使昆虫的偏振视觉系统具有极低的光强依赖性, 即“弱光强化, 强光弱化”

图1 昆虫DRA复眼照片^[9]. (a) 蟋蟀; (b) 金龟子; (c) 蜜蜂; (d) 沙蚁
Figure 1 Insects' DRA compound eye. (a) Cricket; (b) scarab beetles; (c) honey bee; (d) *Catalyphis*

图2 (网络版彩色)蝗虫DRA区域小眼结构
Figure 2 (Color online) Structure of locust' DRA eye

的特点^[15,16]。研究发现, 蟋蟀具有三类POL-neurons, 其主要响应方向分别为 10° 、 60° 和 130° (图4), 蟋蟀通过对三类POL-neurons输出信号进行综合处理, 即可得出体轴与太阳子午线的夹角, 从而实现导航功能^[17]。同时, DRA内众多偏振光敏感小眼的综合视野范围宽广(图5)^[18], 昆虫可对视野内的偏振信息进行整合, 进而增强偏振视觉系统的鲁棒性及绝对灵敏度^[6,19], 降低视野内云、树叶等干扰因素的影响, 使其在多种天气、光照条件下都能较好地进行偏振光导航^[20]。

图3 昆虫DRA小眼微绒毛扫描电子显微镜照片^[9]. (a) 蟋蟀; (b) 金龟子; (c) 蜜蜂; (d) 沙蚁

Figure 3 SEM photos of insects' DRA eyes. (a) Cricket; (b) scarab beetles; (c) honey bee polarized; (d) *Catalyphis*^[9]

图4 (网络版彩色)蟋蟀偏振敏感结构机理. (a) 蟋蟀DRA小眼神经感杆分布形式示意图; (b) 蟋蟀三类POL-neurons, 其主要响应方向分别为10°, 60°和130°^[17]

Figure 4 (Color online) mechanism of cricket's polarized sensitive structure. (a) Dorsal rim ommatidium of cricket; (b) cricket's three kinds of POL-neurons, orientation: 10°, 60° and 130°^[17]

2 偏振导航传感器研究现状

受到昆虫奇特偏振光导航能力的启发, 基于天空偏振光的天文导航技术已成为仿生导航技术领域研究热点, 其主要研究内容包括天空偏振光分布模式, 偏振光导航模型和偏振导航传感器开发等方面。

1509年, Arago首次发现了天空光的偏振现象。Strutt^[21]在1870创立了Rayleigh散射理论, 该理论可以较为准确地反映晴朗天空散射光的偏振分布。随

图5 (网络版彩色)晴朗天空偏振光分布模式示意图及蟋蟀DRA区域视野范围^[18]

Figure 5 (Color online) Polarized pattern under clear sky and field of view of crickets' DRA area^[18]

着光学探测技术手段的进步, 大气偏振测量得到了越来越深入的研究。1981年, Brines等人^[22]采用点源式偏振测量装置, 以每隔5°太阳仰角和方位角对天空中偏振光进行精确扫描测量。这种方法虽能实现整个天空偏振信息的测量, 但实时性较差, 天体及云等运动所造成的误差较大。1997年, Voss等人^[23]采用鱼镜头及相机, 搭建了偏振辐射度探测系统, 采用该系统对视野内偏振特性进行了探测。这种方法克服了点源式测量方法实时性不足的缺点, 但系统本身存在的噪声和非线性干扰降低了测量的准确性。1999年, Horvath等人^[24]对日出时天空偏振模式进行了测试, 并分析了偏振分布模式与太阳位置的关系, 从而进一步验证了Rayleigh散射理论对天空光偏振分布的指导意义。

近年来, 国内西北工业大学控制与信息研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所模拟遥感实验室、东北师范大学遥感研究室、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院遥感应用研究所、北京大学、清华大学、国防科技大学及大连理工大学等国内多家单位都开展了天空偏振模式的相关研究工作。中国科学院安徽光学精密机械研究所开发了实验型多波段偏振CCD相机, 以Y-12飞机为平台进行了飞行试验^[25]。中国科学院上海精密机械研究所王向朝研究组^[26]基于米氏散射理论对太阳光散射偏振特性进行了分析。清华大学赵开春等人^[27]搭建了基于电机驱动旋转偏振片的天空偏振光观测装置, 并采用该装置对天空偏振光进行了观测。Yang等人^[28]提出了利用中性点进行偏振遥感实验所需要的条件, 并初步分析出, 波长较长

的波段更适合于偏振遥感观测。大连理工大学课题组首先对天空偏振光的基本分布模式进行了深入研究。根据Rayleigh散射理论分析了晴朗天空中偏振光的分布规律^[29]，又采用基于倍加-累加法及分析了多种天气情况下的天空偏振光分布模式^[30,31]，并根据理论分析对昆虫的偏振光谱偏好位于蓝紫波段进行了解释，进而为偏振光导航传感器的应用提出了建议^[32]。为验证基于理论分析所得偏振分布规律，课题组搭建了点源式天空偏振光分布测量装置，对天空偏振光进行了实际测量^[33]。基于理论及实际测量所得数据，课题组开发了相应的计算软件，实现了对太阳位置运动和全天空偏振光分布模式的实时计算。

偏振光导航模型研究方面，中北大学刘俊研究组^[34]提出了一种基于聚类分析确定Rayleigh大气模式下太阳位置的方法，并进行了仿真与实验。国防科技大学Xian等人^[35]使用最小二乘法对单方向传感器进行标定。清华大学尤政研究组^[36]利用太阳子午线上偏振方位角都是 90° 这一特征和偏振成像技术来确定太阳方位角。大连理工大学课题组提出了一种基于偏振光和地球磁场的实时仿生定位方法^[37]，开发了实验装置，并进行了室外实验。

偏振导航传感器开发方面，国际上，1997年瑞士Lambrinos等人^[38]模仿沙蚁的偏振导航机理，采用多个独立并垂直指向天空的偏振光传感器，实现了移动机器人的偏振导航(图6)，验证了仿生偏振导航的可行性。

2002年德国Schmolke等人^[39]在室内人造偏振光环境下，成功进行了移动机器人路径跟踪实验。2012年澳大利亚Chahl等人^[40]模仿蜻蜓偏振敏感导航机

理，研制了包含3个独立敏感单元的偏振光传感器，并采用该传感器成功进行了无人机航向角测量(图7)。

国内有多个院校的研究者研究了偏振导航传感器样机的搭建。大连理工大学课题组在国内率先开发出仿生导航传感器样机(图8)。根据昆虫偏振光导航结构和机理相关研究结论，偏振光导航传感器必须包含偏振器、光电探测器以及电路处理模块，以分别模仿生物体复眼DRA区域小眼中的微绒毛结构、感受光强的光感受器以及负责处理光信号的视神经叶部分。偏振导航传感器的工作原理框图如图9所示。实现偏振光方位敏感的主要功能结构是偏振方向分析器，它们在功能上与昆虫神经系统中的偏振神经元相似。每一个偏振方向分析器由一对带有对数比率放大器的偏振光探测单元组成。如图10所

图7 (网络版彩色)澳大利亚Chahl等人开发的仿蜻蜓偏振光传感器^[40]
Figure 7 (Color online) Polarization navigation sensor inspired by dragonflies^[40]

图6 搭载有Lambrinos等人开发的仿沙蚁的偏振导航传感器^[38]
Figure 6 Polarization navigation sensor inspired by catalyphis^[38]

图8 (网络版彩色)本课题组开发的六通道仿生导航传感器样机
Figure 8 (Color online) Bio-inspired navigation sensor with six channels developed by our group

图9 偏振导航传感器工作原理框图

Figure 9 Work principle of navigation sensor

图10 (网络版彩色)偏振方向分析器的结构与功能示意图

Figure 10 (Color online) Diagrammatic description of a polarization direction analyzer

示, 一个偏振光探测单元是由配置了线性检偏器和蓝色滤光片的光电二极管构成的. 在每一个偏振方向分析器中两个偏振光探测单元的偏振轴互相垂直用来模仿昆虫复眼中感杆交叉垂直结构. 每对偏振光探测单元的输出信号被输入对数比率放大器, 这6个偏振光探测单元均匀分布在偏振导航传感器主体中. 3对偏振光探测单元的主偏振方向与零度参考线之间的夹角依次为 0° , 60° , 120° . 课题组又采用所开

发的传感器样机成功进行了室外移动机器人导航实验(图11)^[41~43].

合肥工业大学的高隼研究组^[44]研究了平面四通道大气偏振信息检测传感器样机, 其组成与图9类似, 同样包含滤光片、偏振片、光电探测器、对数放大器 and A/D转换等. 图12为搭建的四通道偏振检测传感器样机示意图. 与图8所示的偏振导航传感器样机相比减少了两个通道, 其区别在于后者在偏振信息求解过程中采用了区间划分的算法^[45]. 哈尔滨工业大学的刘佳琦^[46]等搭建了三通道的偏振光测量平台, 测量装置如图13所示. 装置组成与以上两者相比相对简单, 仅包含滤光片、偏振片和光电探测器, 光电探测器的信号直接由示波器得到进而对偏振信息处理. 此外, 宇航智能控制技术国防科技重点实验室江云秋^[47], 西北工业大学周军和刘莹莹^[48]等国内学者也对偏振光导航传感器及其误差分析等方面开展了深入的研究与有益的探索.

以上传感器样机中的偏振敏感单元中使用滤光

图11 (网络版彩色)搭载仿生导航传感器的室外移动机器人导航实验

Figure 11 (Color online) Mobile robot experiments with navigation sensor

图12 合肥工业大学搭建的偏振检测传感器样机示意图^[44]Figure 12 Polarization sensor developed by three channels by Hefei University of Technology^[44]

图13 (网络版彩色)哈尔滨工业大学搭建的三通道偏振光检测装置^[46]
Figure 13 (Color online) Polarization sensor with developed by Harbin Institute of Technology^[46]

片、数个不同偏振化方向的偏振片以及数个光电探测器,而昆虫复眼DRA区域中小眼结构中数个小网膜细胞存在于一个小眼中,即数个偏振敏感单元是集成在一个小眼中的。有必要研究制作集成式的偏振光导航传感器,将滤光片、数个不同偏振化方向的偏振片和光电探测器3种分立元件集成在一个元件上,可以消除安装误差,并进一步减少传感器体积、减轻重量。为偏振导航传感器在航天航空等领域的应用提供有利条件。

2014年,大连理工大学课题组在基于纳米压印工艺研究了集成器件的制作^[49]。集成器件的其中一个单元结构示意图如图14所示,双层金属纳米光栅作为偏振片制作在硅基光电二极管阵列基底的光敏区中,不同集成单元之间通过隔离沟槽隔离开。其中光电二极管阵列基底由课题组首先在2009年设计并制作^[50,51],为硅基光电探测器,选用的是SOI基底的器件层来做PN结。通过选用薄的器件层,可以抑制长波响应,使最终制作的集成器件对短波长敏感。制

图14 (网络版彩色)双层金属光栅集成器件单个单元示意图
Figure 14 (Color online) Schematic view of the nanowire integrated with photodetector

作的集成器件光学及光栅SEM图如图15所示。可以看出6个不同方向的光栅制作在6个光敏区中,制作的光栅也比较均匀。

课题组基于集成器件搭建了集成偏振光导航传感器,传感器由偏振光检测模块、对数放大器、控制处理模块以及电源模块组成。其中偏振光检测模块即为前面介绍的基于双层金属纳米光栅的集成器件,制作的集成偏振光导航传感器实物图如图16所示。在室内对其测角精度进行了测试(图17),得到的原始测角误差在 $\pm 0.8^\circ$ 以内,经补偿后误差在 $\pm 0.1^\circ$ 以内,可以较好地满足偏振导航的要求。

3 结论

为了适应严酷的自然环境,生物经过35亿年的进化,演化出各种各样感知环境信息的奇异能力,其中就包括一些昆虫与鸟类具备的利用天空偏振光进

图15 (网络版彩色)制作的大面积集成器件的SEM图及光学照片。
(a)~(f) 光敏区中光栅的SEM照片,其光栅角度分别为 0° , 60° , 120° , 90° , 150° 和 30° ; (g) 一个集成探测器单元光学照片,光栅面积为 $1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$; (h) 整个集成片的光学照片

Figure 15 (Color online) Optical and SEM images of the fabricated integration device. (a)~(f) The SEM images of the grating in the sensitive area. The orientations are, correspondingly, 0° , 60° , 120° , 90° , 150° and 30° ; (g) enlarged optical image of the integrated photodetector, the area of the gratings is $1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$; (h) optical image of the integrated device in one chip

图 16 (网络版彩色)制作的集成偏振光导航传感器实物图

Figure 16 (Color online) The figure of the integrated polarization navigation sensor

行导航的能力。而模仿昆虫复眼对偏振光的敏感机理提出并开发的偏振光导航方法，是近些年刚出现的新概念。虽然目前环境偏振光分布规律等许多关键问题仍不是很清楚，处于研究开发阶段，但已有的研究成果已表明该导航方法具有完全自主、误差不随时间累积和实时性好等优点，研究和开发仿生偏振光导航传感器已成为仿生及导航研究领域的

图 17 (网络版彩色)实验得到的测角原始误差和补偿后的误差. 实线: 原始误差; 虚线: 补偿后的误差

Figure 17 (Color online) Angular error as the function of input polarization angle. Solid line: the original error; dashed line: the error after error compensation

热点。目前，偏振光导航传感器研究领域主要以微型化为发展趋势，研究与开发一种完全自主化，并具有结构紧凑、实时性好、成本低等优点的新型导航定位技术及系统具有重要的研究意义与实际应用价值，可为交通运输、科学研究及资源勘测等社会各领域提供一种行之有效的导航手段，进而产生显著的经济效益和社会效益。

参考文献

- 1 Frisch K V. Die polarisation des himmelslichtes als orientierender faktor bei den tnzen der bienen. *Experientia*, 1949, 5: 142–148
- 2 Labhart T. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system. *Nature*, 1988, 331: 435–437
- 3 Brunner D, Labhart T. Behavioural evidence for polarization vision in crickets. *Physiol Entomol*, 1987, 12: 1–10
- 4 Mappes M, Homberg U. Behavioral analysis of polarization vision in tethered flying locusts. *J Comp Physiol A*, 2004, 190: 61–68
- 5 Reppert S M, Zhu H S, White R H. Polarized light helps monarch butterflies navigate. *Curr Biol*, 2004, 14: 155–158
- 6 Gal J, Horvath G, Barta A S, et al. Polarization of the moonlit clear night sky measured by full-sky imaging polarimetry at full moon comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies. *J Geophys Res: Atmos*, 2001, 106: 22647–22653
- 7 Hulst H C. *Light Scattering By Small Particle*. New York: Wiley, 1957. 119–130
- 8 Pomozi I, Horvath G, Wehner R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: Full-sky measurements and implications for animal orientation. *J Exp Biol*, 2001, 204: 2933–2942
- 9 Labhart T, Meyer E P. Detectors for polarized skylight in insects: A survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye. *Microsc Res Tech*, 1999, 47: 368–379
- 10 Muheim R. Behavioral and physiological mechanisms of polarized light sensitivity in birds. *Philos Trans R Soc B: Biol Sci*, 2011, 366: 763–771
- 11 Adle K. Extraocular photoreception in amphibians. *Photochem Photobiol*, 1976, 23: 275–298
- 12 Freake M J. Evidence for orientation using the e-vector direction of polarised light in the sleepy lizard *Tiliqua rugosa*. *J Exp Biol*, 1999, 202: 1159–1166
- 13 Greif S, Borissov I, Yovel Y, et al. A functional role of the sky's polarization pattern for orientation in the greater mouse-eared bat. *Nat Commun*, 2014, 5: 1–10
- 14 Homberg U, Paech A. Ultrastructure and orientation of ommatidia in the dorsal rim area of the locust compound eye. *Arthropod Struct Develop*, 2002, 30: 271–280

- 15 Labhart T, Petzold J. Processing of polarized light information in the visual system of crickets. *Sens Syst Arthropods*, 1993, 158–168
- 16 Labhart T. How polarization-sensitive interneurons of crickets perform at low degrees of polarization. *J Exp Biol*, 1996, 199: 1467–1475
- 17 Labhart T, Petzold J, Helbling H. Spatial integration in polarization-sensitive interneurons of crickets: A survey of evidence, mechanisms and benefits. *J Exp Biol*, 2001, 204: 2423–2430
- 18 Blum M, Labhart T. Photoreceptor visual fields, ommatidial array, and receptor axon projections in the polarisation-sensitive dorsal rim area of the cricket compound eye. *J Comp Physiol A*, 2000, 186: 119–128
- 19 Labhart T. How polarization-sensitive interneurons of crickets see the polarization pattern of the sky: A field study with an opto-electronic model neurone. *J Exp Biol*, 1999, 202: 757–770
- 20 Henze M J, Labhart T. Haze, clouds and limited sky visibility: polarotactic orientation of crickets under difficult stimulus conditions. *J Exp Biol*, 2007, 210: 3266–3276
- 21 Strutt J W. On the light from the sky, its polarization and color. *Philos Mag Series*, 1871, 61: 107–279
- 22 Brines M L, Gould J L. Skylight polarization patterns and animal orientation. *J Exp Biol*, 1982, 96: 69–91
- 23 Voss K J, Liu Y. Polarized radiance distribution measurements of skylight. *Appl Opt*, 1997, 36: 6083–6094
- 24 Horvath G, Wehner R. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry. *J Comp Physiol A*, 1999, 184: 1–7
- 25 Luo R Z, Qiao Y L, Hao P M, et al. Polarization analysis of optical system in airborne multi-band polarization CCD camera system (in Chinese). *Chin J Quantum Electron*, 2004, 6: 396–400 [罗睿智, 乔延利, 郝沛明, 等. 偏振 CCD 相机光学系统的偏振特性分析. 量子电子学报, 2004, 6: 396–400]
- 26 Huang X F, Bu Y, Wang X C. Skylight polarization patterns based on mie theory for scattering (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2010, 37: 3002–3006 [黄旭峰, 步扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性. 中国激光, 2010, 37: 3002–3006]
- 27 Zhao K C, Lu H, You Z. Automatic detection system for skylight polarized pattern (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2013, 21: 239–245 [赵开春, 卢皓, 尤政. 天空光偏振模式自动探测装置. 光学精密工程, 2013, 21: 239–245]
- 28 Yang S Q, Guan G X, Zhao H M, et al. Airborne validation of ground-object detection from polarized neutral-point atmosphere. *Spectrosc Spect Anal*, 2013, 33: 2525–2531
- 29 Yao H Y. Research on the skylight polarization for the bionic micro-nano navigation system (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 [姚弘轶. 面向仿生微纳导航系统的天空偏振光研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2006]
- 30 Wang W, Chu J K, Cui Y, et al. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2013, 40: 0513001 [王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模. 中国激光, 2013, 40: 0513001]
- 31 Liu Q, Chu J K, Wang J, et al. Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2014, 34: 0301004 [刘琦, 褚金奎, 王兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析. 光学学报, 2014, 34: 0301004]
- 32 Liu Q. Research on skylight polarization properties and sensitive spectrum under complex atmosphere (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2014 [刘琦. 复杂大气下的天空光偏振特性及敏感光谱研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2014]
- 33 Cao N N. Research on polarized characteristics of scattering skylight for the bionic navigation (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2008 [曹楠楠. 应用于仿生导航的天空散射光的偏振特性研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2008]
- 34 Ren J B, Liu J, Tang J, et al. A skylight polarization pattern-based approach to the location of the sun and solar meridian (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2015, 44: 0701002 [任建斌, 刘俊, 唐军, 等. 利用大气偏振模式确定太阳和太阳子午线空间位置法. 光子学报, 2015, 44: 0701002]
- 35 Xian Z W, Hu X P, Lian J X, et al. A novel angle computation and calibration algorithm of bio-inspired sky-light polarization navigation sensor. *Sensors*, 2014, 14: 17068–17088
- 36 Lu H, Zhao K C, You Z, et al. Angle algorithm based on hough transform for imaging polarization navigation sensor. *Opt Express*, 2015, 23: 7248–7262
- 37 Wang Y L, Chu J K, Zhang R, et al. A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field. *Sci Rep*, 2015, 5: 9725
- 38 Lambrinos D, Maris M, Kobayashi H, et al. An autonomous agent navigating with a polarized light compass. *Adap Behavior*, 1997, 6: 131–161
- 39 Schmolke A, Mallot H A. Polarization compass for robot navigation. In: *Proceedings of Fifth German Workshop on Artificial Life*, Lübeck. Lübeck: IOS Press, 2002. 163–167

- 40 Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and orientation sensors. *IEEE Sens J*, 2012, 12: 289–297
- 41 Chu J K, Zhao K C. Study of angle measurement optoelectronic model on emulating polarization-sensitive compound eye of insect (in Chinese). *Nanoelectr Device Technol*, 2005, 12: 541–545 [褚金奎, 赵开春. 仿昆虫复眼偏振敏感测角光电模型研究. *微纳电子技术*, 2005, 12: 541–545]
- 42 Chu J K, Zhao K C, Zhang Q, et al. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation. *Sensors Actuat A-Phys*, 2008, 148: 75–82
- 43 Chu J K, Chen W J, Wang H Q, et al. Mobile robot navigation tests with polarization sensors (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2011, 19: 2419–2426 [褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验. *光学精密工程*, 2011, 19: 2419–2426]
- 44 Fan N S, Zhang X D, Fan Z G, et al. Study on polarized light navigation sensor of imitating biological POL neurons (in Chinese). *Transd Microsyst Technol*, 2011, 30: 53–56 [范宁生, 张旭东, 范之国, 等. 仿生 POL 神经元的偏振光导航传感器研究. *传感器与微系统*, 2011, 30: 53–56]
- 45 Chen W J. Design of bionic polarization navigation sensor (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 [陈文静. 仿生偏振光导航传感器设计. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2010]
- 46 Liu J Q. Polarized-light-aided attitude determination in integrated navigation systems (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 [刘佳琦. 偏振光辅助定姿在组合导航中的应用. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010]
- 47 Jiang Y Q, Gao X Y, Jiang P L, et al. Model and error analysis of polarization navigation sensor (in Chinese). *J Project Rockets Missiles Guid*, 2009, 29: 22–24 [江云秋, 高晓颖, 蒋彭龙, 等. 偏振导航传感器建模与误差分析. *弹箭与制导学报*, 2009, 29: 22–24]
- 48 Zhou J, Liu Y Y. Research progress of polarized skylight navigation (in Chinese). *J Astronaut*, 2009, 30: 409–414 [周军, 刘莹莹. 基于自然偏振光的自主导航新方法研究进展. *宇航学报*, 2009, 30: 409–414]
- 49 Chu J K, Wang Z W, Guan L, et al. Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26: 469–472
- 50 Han Z T, Chu J K, Meng F T. Design and simulation of blue/violet sensitive photodetectors in silicon-on-insulator. *J Semicond*, 2009, 30: 104008
- 51 Chu J K, Han Z T, Meng F T, et al. Spectral response of blue-sensitive Si photodetectors in SOI. *Solid State Electron*, 2011, 55: 54–58

Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor

CHU JinKui, ZHANG Ran, WANG ZhiWen & WANG YinLong

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Navigation technology is indispensable for both animal and human. Navigation sensor plays an important role in emergency rescue, precision-guided weapons, ship exploration, aircraft navigation, and satellites positioning system. To reach nests or favorable grounds, many insects have evolved navigational ability that can obtain the solar azimuth by detecting the polarized skylight. This polarized pattern in the sky arises, due to the sunlight scattering in the atmosphere. In the single-scattering Rayleigh atmosphere, the direction of polarization is perpendicular to the scattering plane determined by the observer, the observed celestial point and the sun. Some insects can finish long-distance migration to survive in the seasonal changing environments. Inspired by the amazing capacity, kinds of sensors have been developed depending on the structure of the insects' compound eyes and the insects' visual mechanism. Integrated polarization dependent sensors have the features of compact structure, high precision, strong robustness, and simple fabrication process. This kind of sensor is composed of a complementary-metal-oxide-semiconductor sensor integrating with a multiorientation nanowire grid polarizer, and also the working principle of the sensor is described. The astronomy navigation technology based on polarized skylight has already become the innovation and research focus, even though the navigational mechanism of insects is still not very clear. In the meantime, the miniaturization and integration are new directions for the future research of navigation sensors. Additionally, to prevent navigational errors, it is necessary to calibrate orientation compass. Modern navigation technologies such as GPS have made themselves straightforward for mankind to locate global positions. These techniques are classified as satellite navigation, radio navigation, inertia navigation or celestial navigation. Unfortunately each of these techniques has their own weakness. For example, satellite navigation has the possibility of jamming and satellite signal loss. Radio navigation cannot work without base stations. Inertia navigation needs to correct its peculiar accumulated errors. And celestial navigation is complex and very expensive. The existing researches show that the astronomy navigation technology is real-time and autonomous and can work without accumulation of errors. Polarized skylight is one of the multitude of sensory information used by animals, thus there is much future work waiting for researchers to develop.

bio-inspired, polarized skylight, navigation sensor, insects

doi: 10.1360/N972015-01163